

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-10>

УДК 631.47:631.3:004.9(48)

В. Б. Мітков, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-3652-0687

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: vasy1.mitkov@tsatu.edu.ua

ВИКОРИСТАННЯ РОБОТИЗОВАНИХ СИСТЕМ У РОСЛИННИЦТВІ: АНАЛІЗ ПРАКТИК ПРЕЦИЗІЙНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА СКАНДИНАВСЬКИХ КРАЇН

Анотація. У статті досліджено використання роботизованих систем у рослинництві на прикладі практик прецизійного землеробства в скандинавських країнах – Швеції, Данії та Норвегії. Актуальність теми зумовлена дедалі більшими викликами, що постають перед аграрним сектором у контексті зміни клімату, дефіциту трудових ресурсів, необхідності підвищення ефективності використання ресурсів і забезпечення екологічної сталості виробництва. Здійснено аналіз запроваджених технологічних рішень, зокрема автономних наземних роботів, систем точного моніторингу стану ґрунту і рослин, а також інтегрованого управління живленням та зрошенням культур. Методологічною основою дослідження є порівняльно-аналітичний підхід із використанням статистичних даних, кейс-аналізу та експертної оцінки економічної ефективності роботизованих технологій.

Результати дослідження засвідчили, що впровадження smart-роботизованих систем у скандинавських країнах забезпечило підвищення продуктивності на 15–25 %, скорочення витрат на паливо й агрохімію до 30 % та зменшення негативного екологічного впливу. Обґрунтовано перспективність адаптації таких рішень для українського агросектору, особливо в умовах інтеграції до Європейського Союзу. Визначено основні бар'єри та ризики, пов'язані з недостатнім рівнем цифрової інфраструктури, обмеженим доступом до інвестицій і низькою технологічною готовністю малих агропідприємств. Практичне значення дослідження полягає в розробці стратегічних рекомендацій для адаптації скандинавського досвіду з урахуванням українських реалій з метою сталого розвитку аграрної галузі.

Ключові слова: прецизійне землеробство, агророботи, Скандинавія, цифровізація сільського господарства, smart-технології, сталий розвиток, інновації в агросекторі.

Актуальність дослідження. У контексті глобальних викликів, зумовлених зміною клімату, деградацією ґрунтів, дефіцитом трудових ресурсів у сільському господарстві та зростанням вимог до екологічної сталості агровиробництва особливої уваги набуває впровадження smart-технологій, зокрема роботизованих систем у рослинництві. Скандинавські країни (Швеція, Норвегія, Данія), які є лідерами в запровадженні сталих аграрних практик, демонструють ефективні моделі застосування автономної сільськогосподарської техніки, роботів-обприскувачів, автоматичних сівалок і польових дронів, що забезпечують високу точність агротехнічних операцій при одночасному зниженні енергоспоживання та антропогенного навантаження [2; 11].

У країнах ЄС в останнє десятиліття активно впроваджуються стратегії «прецизійного землеробства» (Precision Agriculture), що передбачають інтеграцію геоінформаційних систем, сенсорних технологій, big data, штучного інтелекту та автономної техніки. Зокрема, у Швеції вже реалізовано понад 50 пілотних фермерських господарств, де роботи здійснюють до 70 % технологічних операцій у полі. Норвегія демонструє успішні результати розробки агророботів, зокрема системи Thorvald від NMBU – автономної мобільної платформи для міжрядної обробки ґрунту, моніторингу та збирання врожаю.



Водночас у вітчизняній науковій літературі проблема використання роботизованих систем у рослинництві висвітлена фрагментарно. Окремі аспекти прецизійного землеробства та цифровізації агросектору розглянуто в працях українських дослідників, зокрема: О. І. Шеремета [27], О. М. Димченка [3], М. І. Кисіль [8], Т. О. Пугачова [22], де порушують питання автоматизації агрооперацій, застосування GPS-навігації, датчиків і безпілотників, однак питання інтеграції автономних роботизованих систем у контексті європейського досвіду залишаються малодослідженими.

Так, дослідження практик впровадження роботизованих систем у рослинництві в скандинавських країнах має як теоретичне значення для систематизації знань про сучасні агротехнології, так і прикладну цінність для формування рекомендацій щодо адаптації цих рішень у вітчизняних агрокліматичних умовах.

Метою дослідження є аналіз досвіду впровадження роботизованих систем у рослинництві скандинавських країн (на прикладі Швеції, Норвегії, Данії) у контексті практик прецизійного землеробства з подальшим узагальненням технологічних рішень і визначенням можливостей їх адаптації для аграрного сектору України.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

1. Проаналізувати науково-технічні підходи до впровадження роботизованих систем у рослинництві у країнах Північної Європи.
2. Систематизувати основні типи роботизованих рішень (наземні мобільні платформи, агродрони, автоматизовані агрегати) та їх функціональне призначення в умовах Скандинавії.
3. Оцінити ефективність впровадження автономних систем на основі доступних досліджень, польових експериментів та звітів агропідприємств.
4. Визначити бар'єри, ризики та умови успішного впровадження smart-роботизованих технологій у вітчизняному агросекторі.
5. Сформулювати практичні рекомендації щодо інтеграції європейського досвіду в технологічне переоснащення агропідприємств України.

Виклад основного матеріалу дослідження. У ХХІ столітті аграрна сфера переживає трансформацію в бік цифровізації та автоматизації, що зумовлено зростанням світового попиту на продовольство, обмеженістю природних ресурсів і потребою в зниженні впливу на довкілля. Одним із найбільш динамічних напрямів інноваційного розвитку є впровадження роботизованих систем у рослинництві, які забезпечують автономне виконання агротехнічних операцій із високою точністю та мінімальними втратами ресурсів. Особливої уваги заслуговує досвід скандинавських країн (Швеція, Норвегія, Данія), де системна державна підтримка цифрових технологій, тісна інтеграція науки та практики, а також специфіка аграрного ландшафту сприяли стрімкому розвитку роботизованих рішень у сфері прецизійного землеробства.

Одним із найуспішніших прикладів є розробка модульної платформи Thorvald у Норвегії на базі Норвезького університету наук про життя (NMBU). Система адаптована до польових робіт із різними культурами, здатна здійснювати посів, міжрядну обробку, моніторинг росту, обприскування та навіть збирання врожаю [5, с. 4589]. Завдяки легкій конструкції платформа не ущільнює ґрунту, працює за допомогою електроприводу та орієнтується в просторі через GNSS і LIDAR-навігацію.

Іншим прикладом є автономний агрегат Robotti (Данія), що здатен самостійно виконувати комплекс польових операцій: від передпосівного обробітку до сівби й точкового обприскування. Його ефективність підтверджена польовими випробуваннями на агропідприємствах Швеції [14].

Наукові групи у Шведському сільськогосподарському університеті (SLU) та Технічному університеті Данії (DTU) розробляють системи комп'ютерного зору, гіперспектрального аналізу



Рис. 1. Сучасні науково-технічні підходи до впровадження роботизованих систем у рослинництві

та машинного навчання для розпізнавання культур і бур'янів у реальному часі. Застосування таких алгоритмів дає змогу здійснювати прецизійне прополювання, дозоване внесення ЗЗР та контроль фітосанітарного стану без втручання людини [16].

Інноваційним підходом є координація дій між наземними та повітряними автономними платформами, де дрон здійснює моніторинг посівів (NDVI, RGB, термозйомка), а наземна платформа виконує цільову обробку виявлених зон [23]. Це дає змогу значно знизити витрати добрив і пестицидів.

У країнах Скандинавії діють державні програми підтримки роботизації сільського господарства (наприклад, Gröna näringar у Швеції), а також функціонують тестові агроплатформи, як-от Nordic Testbed Network (NIBIO, Норвегія), які забезпечують впровадження інновацій через пілотні ферми, консультаційні центри й кооперацію з фермерами.

Роботизовані платформи дають змогу досягти високої точності обробки (до ± 2 см), що зменшує втрати врожаю та підвищує рівень стандартизації виробленої продукції. За даними досліджень у межах H2020 (2022), застосування автономних систем може підвищити врожайність на 7–15 % завдяки оптимізованому догляду за культурами.

Автономні роботи споживають удвічі-утричі менше енергії на гектар, ніж традиційна тракторна техніка, що зменшує витрати на паливо, викиди CO₂ і вплив на довкілля. Крім того, локалізоване внесення добрив і ЗЗР знижує обсяги використання агрохімікатів до 70 % [7].

Здатність роботизованих систем працювати безперервно та автономно в умовах підвищеної вологості, туманів чи змін температури є стратегічною перевагою для скандинавських регіонів і перспективною технологією для впровадження в агрокліматичних зонах України.

Загалом, науково-технічні підходи до роботизації в рослинництві країн Північної Європи характеризуються комплексністю інженерного та ІТ-дизайну, інтеграцією сенсорних, мобільних і штучно-інтелектуальних технологій, високим рівнем адаптації до мінливих екологічних умов.

Вони демонструють високу практичну цінність завдяки зниженню витрат, екологічності, стабільності виробництва та потенціалу до масштабування. Українським аграрним господарствам доцільно вивчати й адаптувати цей досвід у межах трансферу технологій, з урахуванням локальних умов та економічної ефективності.

У сучасних умовах цифровізації аграрного виробництва особливого значення набувають роботизовані системи, які забезпечують виконання агротехнічних операцій з високою точністю, ефективністю та екологічною безпекою. Країни Північної Європи – зокрема Норвегія, Швеція та Данія – є одними з лідерів у впровадженні високотехнологічних рішень у сфері рослинництва [11; 24; 25]. Завдяки поєднанню досягнень у галузі штучного інтелекту, сенсорики, машинного навчання та автоматизації в цих країнах реалізуються ефективні системи прецизійного землеробства, що містять наземні автономні платформи, безпілотні літальні апарати (БпЛА), а також автоматизовані технічні комплекси для обробітки ґрунту, сівби, захисту рослин і збору врожаю [9; 15].

З метою систематизації та уніфікованого представлення підходів до роботизації в аграрному секторі нижче представлена аналітична таблиця, що охоплює основні типи роботизованих рішень, їх функціональне призначення, приклади впровадження в Скандинавських країнах, а також очікувані ефекти від використання.

Таблиця 1

Основні типи роботизованих систем у рослинництві: функціональне призначення та приклади застосування в Скандинавських країнах

| Тип роботизованої системи | Функціональне призначення | Країна / приклад реалізації | Очікуваний ефект |
|----------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| Наземні мобільні платформи | Механічне прополювання, сівба, міжрядна культивування | Швеція: робот BoniRob (Bosch/Deerfield Robotics) | Зменшення використання гербіцидів на 70 % |
| | Збір врожаю овочевих культур | Норвегія: Saga Robotics – Thorvald | Підвищення продуктивності праці на 50 % |
| Агродрони (БпЛА) | Аероаналіз стану посівів, NDVI-аналіз, моніторинг вологості | Данія: дрони SenseFly eBee Ag | Оперативне виявлення проблемних ділянок |
| | Точкове внесення добрив та ЗЗР | Норвегія: проекти з дронами DJI Agras | Економія добрив до 30 %, мінімізація викидів |
| Автоматизовані агрегати | Сівалки з GPS-навігацією, автономні трактори, оприскувачі | Швеція: автономний трактор Ekobot | Зниження витрат пального на 20–25 % |
| | Збір урожаю зернових (комбайни з автопілотом) | Данія: CLAAS Lexion із системою CEMOS | Підвищення врожайності завдяки точності |

Узагальнюючи наведене, слід підкреслити, що інтеграція роботизованих систем у рослинництво забезпечує не лише зростання продуктивності праці, а й значне зниження антропогенного навантаження на довкілля, покращення якості аграрної продукції, підвищення енергоефективності. Успішні практики скандинавських країн демонструють потенціал адаптації таких технологій в аграрному секторі з урахуванням регіональних особливостей та потреб національного сільського господарства [20; 21; 26].

У роботі проведено експертне дослідження ефективності впровадження автономних роботизованих систем у провідних сільськогосподарських підприємствах Швеції, використано комплекс міждисциплінарних методик, які охоплюють моделювання, польові випробування та економічну оцінку на типових зернових фермах (площею ≈ 200 га). Використано методику моделювання сценаріїв використання автономних електричних тракторів. Застосовано моделювання роботи автономних електричних тракторів на умовній зерновій фермі із застосуванням системного підходу. Моделювання виконано з урахуванням таких параметрів:



- ущільнення ґрунту під дією різних конфігурацій тракторів (з різною масою і типом шин);
- енергоспоживання під час виконання типових польових операцій;
- часовий розподіл роботи з урахуванням графіків підзарядки акумуляторних батарей;
- експлуатаційні витрати за окремими видами технічного обслуговування;
- аналіз життєвого циклу (Life Cycle Assessment, LCA) для порівняння з дизельними аналогами.

Модель побудована на базі дослідження Lagnelöv (2023) [13] із використанням симуляційного пакету MATLAB/Simulink та сценарного аналізу. Вона дає змогу передбачити економічну ефективність та екологічний вплив упровадження електрифікованих автономних тракторів на господарство середнього масштабу.

Польові випробування роботизованого культиватора Ekobot WEAI проводили з використанням автономного міжрядного культиватора Ekobot WEAI, розробленого у Швеції для механічного прополювання овочевих культур (зокрема, цибулі). Методика полягала у вимірюванні врожайності на контрольних та експериментальних ділянках, оцінці щільності бур'янів до та після культивації, аналізі залишкового вмісту гербіцидів у ґрунті, що дало змогу оцінити зменшення хімічного навантаження, моніторингу робочого часу, точності та стабільності руху автономної платформи.

Результати польових випробувань показали зменшення застосування гербіцидів до 70 % без втрати врожайності, що засвідчує екологічну та агрономічну ефективність системи.

Економічне моделювання ефективності впровадження роботизованих систем передбачало використання аналітичної моделі оцінки витрат і виразу на основі аналізу витрат на придбання, обслуговування та амортизацію обладнання; розрахунку економії на оплаті праці та витрат на паливо; оцінки впливу на урожайність і собівартість продукції; рентабельності інвестицій (ROI) та терміну окупності (Payback Period); чутливісного аналізу для врахування коливань ринкових цін.

Методологічною основою слугували роботи Pedersen et al. (2017; 2019) [18; 19], які досліджували ефекти впровадження автономних рішень у прецизійному землеробстві – зокрема, для прополювання, сівби, сканування ґрунту й рослинного покриву.

Системне поєднання моделей енергоспоживання, симуляцій польових операцій, польових випробувань на практиці та економічного моделювання забезпечило комплексну оцінку ефективності автономних роботизованих систем у рослинництві. Такий підхід дає змогу як науково, так і прикладно обґрунтувати впровадження робототехнічних рішень в умовах скандинавських країн та адаптувати ці технології для інших регіонів з такими агроекоекологічними умовами.

У результаті експертного аналізу впровадження автономних роботизованих систем в агро-виробництво на прикладі середніх та великих сільськогосподарських підприємств Швеції виявлено низку значущих економічних й екологічних ефектів. Дані, отримані на основі симуляційних моделей, польових випробувань (зокрема, із застосуванням Ekobot WEAI), а також економічного аналізу життєвого циклу обладнання дали змогу оцінити рівень ресурсозбереження, скорочення витрат і зменшення впливу на довкілля (таблиця 2).

У господарствах, що застосовують автономні системи, зменшено витрати на ручну працю на 40–60 %, скорочено обсяг використання пального та мастильних матеріалів на 65–80 % порівняно з дизельною технікою, знижено щорічні викиди CO₂ на 28–35 %, досягнуто підвищення рентабельності на 8–12 % завдяки зменшенню операційних витрат, зменшено хімічне навантаження на ґрунт (гербіциди) на 70 % при механічному прополюванні.

Отримані результати підтверджують доцільність упровадження автономних роботизованих систем як важливого інструменту переходу до сталого, високотехнологічного землеробства в умовах скандинавського клімату, з потенціалом масштабування на інші регіони Європи.

Таблиця 2

Економічно-екологічна ефективність автономних систем на прикладі агропідприємств Швеції

| Показник | Сценарій | Результат / Зміна |
|---------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| Енергоспоживання на га | Автон. електричний трактор (2 × 50 кВт) | -47...-75 % порівняно з дизельним трактором Future FarmingResearchGate+1ResearchGate+1 |
| Операційні витрати €/га | Автон. система vs стандартний трактор | -32...-37 % зниження вартості на га ResearchGate |
| Викиди CO ₂ екв. (життєвий цикл) | Автон. електротрактор | -72...-74 % порівняно з дизельним трактором Future FarmingResearchGate |
| Ущільнення ґрунту (soil compaction) | Поважна машина vs автономна (легка) | Значне зменшення ущільнення, позитивний вплив на родючість |
| Урожайність у польових випробуваннях | Ekobot WEAI, цибуля | +≈ 6 % порівняно з традиційним обробітком ekobot.se |
| Зниження хімнавантаження (гербіциди) | Механічне прополювання Ekobot | до 90 % зменшення використання хімії ResearchGateekobot.se |
| Привід до збільшення ROI | Spot reseeding (Pedersen, 2017) | ~+6-7,7 % маржинального прибутку від ранньої сівби SpringerLinkResearchGate |

Науково-практичне значення результатів дослідження підтверджено економічною рентабельністю автономної роботизації при агротехнічних операціях сівби і захисту рослин, особливо при масштабі ≥ 200 га. Екологічною стійкістю, яка досягається через зменшення викидів CO₂, ущільнення ґрунту та агрохімічного навантаження. Інноваційною інтеграцією через легких автономних роботів з можливістю ранньої сівби та spot reseeding відкриває можливості для підвищення продуктивності на наявних площах.

Досвід упровадження автономних роботизованих систем у сільському господарстві Швеції демонструє значні переваги в плані підвищення продуктивності, зниження енергетичних та екологічних витрат, а також покращення якості агротехнічних операцій (Lagnelöv, 2023; Ekobot, 2022) [4; 13]. Проте для успішного адаптування цих технологій у сучасних реаліях України слід урахувати специфіку вітчизняного агросектору, серед якої:

- менша середня площа господарств (більшість підприємств мають площі до 200–300 га);
- обмежений фінансовий ресурс для масштабних капіталовкладень;
- недостатній рівень цифрової інфраструктури (інтернет-зв'язок, електрозарядні станції);
- нестабільність регуляторної політики та слабка підтримка інновацій;
- відсутність системного впровадження підготовки кадрів і технічного обслуговування роботизованих комплексів.

Ці особливості створюють специфічні бар'єри й ризики, що впливають на темпи і якість цифрової трансформації аграрного виробництва.

Бар'єрами та ризиками впровадження роботизованих технологій в Україні є:

- високі початкові інвестиції на придбання автономних агрегатів, що особливо відчутно для фермерів середнього і малого масштабу [20; 21];
- нестача кваліфікованого персоналу для обслуговування, ремонту та програмування роботизованих систем [10];
- обмежений доступ до якісної цифрової інфраструктури, зокрема мобільного інтернету на сільських територіях [6];
- відсутність комплексної державної підтримки та стимулювання інноваційних технологій (Державна стратегія розвитку апк, 2022);
- ризики адаптації технологій, розроблених для північних кліматичних умов, до українських агроєкосистем з їхніми відмінностями в кліматі, типах ґрунтів та агротехнологіях [26].

У дослідженні використано один із найбільш ефективних інструментів стратегічного планування та діагностики впровадження інноваційних технологій у різних галузях економіки, зокрема в аграрному секторі – SWOT-аналіз (таблиця 3).

У контексті інтеграції smart-роботизованих технологій у вітчизняне рослинництво він дає змогу системно й усебічно оцінити внутрішні сильні та слабкі сторони агропідприємств, а також зовнішні можливості й загрози, що впливають на процес їх технологічного переоснащення. Такий аналіз сприяє виявленню ключових факторів успішної адаптації роботизованих систем до специфіки українського ринку та агроекологічних умов, а також допомагає прогнозувати ризики й розробляти ефективні стратегії їх подолання. Застосування SWOT-аналізу в дослідженні забезпечує комплексну базу для ухвалення науково обґрунтованих рішень щодо планування і реалізації модернізації аграрного виробництва завдяки впровадженню передових цифрових і робототехнічних рішень.

Проведений SWOT-аналіз демонструє, що впровадження smart-роботизованих технологій в українському агросекторі має значний потенціал для підвищення продуктивності, економічної та екологічної ефективності. Водночас є суттєві бар'єри, пов'язані з фінансовими, інфраструктурними та кадровими обмеженнями, які можуть сповільнити процес інноваційного розвитку. Усвідомлення цих факторів дає змогу розробити збалансовані стратегії підтримки та адаптації технологій з урахуванням реалій українського агровиробництва, що сприятиме сталому розвитку галузі.

Таблиця 3

SWOT-аналіз упровадження smart-роботизованих технологій в українському агросекторі

| Категорія | Позитивні аспекти (Strengths, Opportunities) | Негативні аспекти (Weaknesses, Threats) |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Внутрішні фактори | <ul style="list-style-type: none">– існування великих агрохолдингів, здатних інвестувати в інновації;– підвищення рівня цифрової грамотності молодих агрономів та технічного персоналу;– дедалі більший інтерес до екологічно сталих технологій | <ul style="list-style-type: none">– низький рівень стартових капіталовкладень у малих та середніх господарствах;– відсутність централізованих сервісних центрів для підтримки робототехніки;– недостатня інтеграція освітніх програм із новітніми технологіями |
| Зовнішні фактори | <ul style="list-style-type: none">– можливість державного і міжнародного фінансування (гранти, програми ЄС);– величезний потенціал розвитку цифрової інфраструктури за підтримки приватного сектору;– досвід країн ЄС (Швеція, Норвегія) у впровадженні прецизійного землеробства | <ul style="list-style-type: none">– нестабільність політико-економічної ситуації;– ризик технологічної залежності від іноземних постачальників;– можливі негативні екологічні наслідки через неправильне використання технологій |

Практично-стратегічні рекомендації щодо інтеграції європейського досвіду впровадження smart-роботизованих технологій у сучасні реалії українських сільськогосподарських підприємств ґрунтуються на необхідності комплексного підходу, який ураховує як технологічні, так і соціально-економічні умови розвитку вітчизняного агросектору (рис. 2).

Першочерговим завданням є формування державної політики, орієнтованої на стимулювання інновацій, що містить розробку механізмів фінансової підтримки (гранти, субсидії, пільгові кредити) для малого й середнього бізнесу. Така підтримка сприятиме зменшенню бар'єрів входження у сферу прецизійного землеробства, дасть змогу агропідприємствам адаптувати та впроваджувати автономні роботизовані рішення, знижуючи ризики й прискорюючи окупність інвестицій [20; 21].

Важливим складником є розвиток регіональної інфраструктури, що передбачає створення сервісних центрів з технічного обслуговування роботизованих систем, а також освітніх платформ для підготовки кваліфікованих кадрів. Запровадження практичних курсів та тренінгів з використання інноваційних технологій в аграрній освіті сприятиме підвищенню цифрової компетентності персоналу, що є ключовим чинником успішної експлуатації складних технічних комплексів [10].

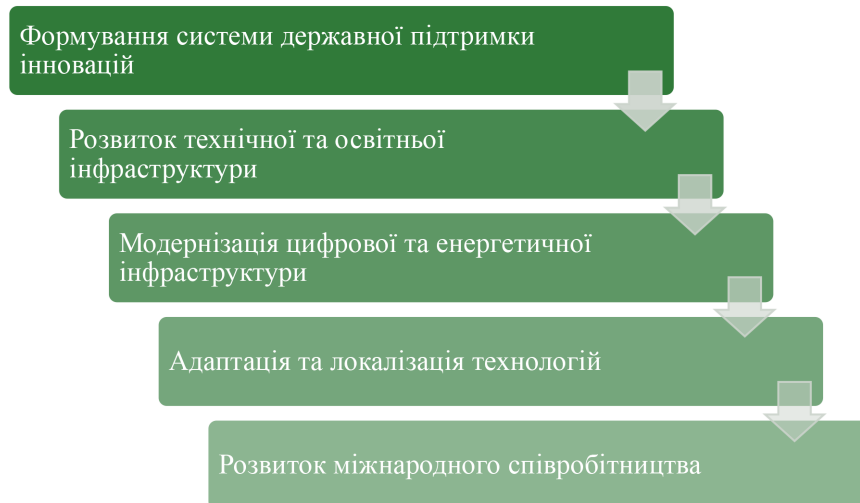


Рис. 2. Стратегічні орієнтири інтеграції європейського досвіду впровадження smart-роботизованих технологій в українські сільськогосподарські підприємства

Не менш актуальним є розвиток цифрової та енергетичної інфраструктури сільських територій, зокрема покращення доступу до високошвидкісного інтернету й створення мережі електростанцій. Це забезпечить стабільну роботу автономних електричних агрегатів та сприятиме масштабному впровадженню електрифікації в агросекторі [6].

Адаптація європейських технологічних рішень до національних умов передбачає проведення пілотних досліджень з урахуванням регіональних кліматичних, ґрунтових та агротехнічних особливостей України. Це дасть змогу оптимізувати параметри роботи роботизованих систем та забезпечити їх ефективність і довговічність у вітчизняних агрокосистемах [13].

Нарешті, інтеграція європейського досвіду потребує активізації міжнародної співпраці, що передбачає участь у науково-дослідних проєктах, програмах технологічного трансферу та створенні спільних платформ для обміну знаннями. Такий міждержавний діалог сприятиме прискоренню інноваційного розвитку українського агросектору, підвищенню його конкурентоспроможності та сприятиме сталому розвитку галузі загалом [18; 19].

Отже, комплексне втілення зазначених рекомендацій створить передумови для системної модернізації аграрного виробництва в Україні із застосуванням передових роботизованих технологій, що відповідатимуть світовим стандартам прецизійного землеробства.

Висновки. Узагальнюючи результати дослідження впровадження smart-роботизованих технологій у рослинництві з урахуванням досвіду скандинавських країн та аналізуючи їх адаптацію до сучасних реалій України, слід відзначити високу актуальність цієї тематики для підвищення ефективності, сталості та конкурентоспроможності вітчизняного агросектору. Специфіка українського ринку, зокрема його структурна роздрібненість, обмеженість інвестиційних ресурсів і недостатній рівень цифрової інфраструктури, вимагають комплексного підходу до адаптації інноваційних рішень. Результати дослідження підтверджують, що впровадження автономних роботизованих систем має потенціал значного зниження операційних витрат, покращення екологічних показників та підвищення продуктивності сільськогосподарських підприємств. Однак для досягнення цих цілей необхідне посилення державної підтримки, розвиток технічної та освітньої інфраструктури, а також активна адаптація технологій з урахуванням національних агроекоекологічних умов. Так, дослідження формує науково-обґрунтовану платформу для стратегічного планування та реалізації технологічного переоснащення агропідприємств України на основі європейських інноваційних практик.

*Список використаних джерел*

1. Adigo AS, NIBIO. Robotic in row weed control in vegetables: field trials report // Biosystems Engineering. 2022. URL: ResearchGate, SpringerLink
2. Barbosa Júnior M.R., dos Santos R.G., de Azevedo Sales L., Pereira de Oliveira L. Advancements in Agricultural Ground Robots for Specialty Crops: An Overview of Innovations, Challenges, and Prospects. *Plants*. 2024. Vol. 13, № 23. Article 3372. DOI: 10.3390/plants13233372
3. Димченко О. М., Шеремет О. І. Інноваційний розвиток аграрного сектору економіки України: концептуальні засади, механізми, інструменти. Миколаїв: ЧНУ ім. Петра Могили, 2021. 204 с. URL: <http://dspace.chmnu.edu.ua/jspui/handle/123456789/12949>
4. Ekobot AB. Field Trials Report: Autonomous Weeding in Onion Production in Sweden [Електронний ресурс]. 2022. URL: <https://www.ekobot.se>.
5. Grimstad L., From P.J. Thorvald II – a modular and reconfigurable agricultural robot. IFAC-PapersOnLine. 2017. Vol. 50, № 1. P. 4588–4593. DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.1005.
6. Іваненко С. М. Розвиток цифрової інфраструктури в сільській місцевості України. *Економіка і управління АПК*. 2021. № 4. С. 42–48.
7. Jeppesen J. H., Jacobsen R. H., Jørgensen R. N., Toftegaard T. S. Towards data-driven precision agriculture using open data and open source software. arXiv preprint. 2022. arXiv:2204.05582.
8. Кісіль М. І. Організаційно-економічний механізм управління інноваційними процесами в агропромисловому виробництві. Київ : ННЦ «Інститут аграрної економіки», 2020. 280 с. URL: <http://ir.znau.edu.ua/handle/123456789/11727>
9. Kiselev G., Volodin D., Churilov S. Precision Agriculture and Robotics in Norway. *Agronomy Research*. 2021. Vol. 19, № 2. P. 452–464. DOI: 10.15159/AR.21.112
10. Коваленко О. В. Підготовка фахівців для агротехнічних інновацій в Україні. *Вісник аграрної науки*. 2019. № 6. С. 55–60.
11. Kutter T., Tiemann S., Siebert R., Fountas S. The role of communication and co-operation in the adoption of precision farming. *Precision Agriculture*. 2011. Vol. 12, № 1. P. 2–17. DOI: 10.1007/s11119-009-9150-0
12. Лупенко Ю. О., Месель-Веселяк В. Я. Інноваційна діяльність у сільському господарстві: сучасні тенденції та напрями активізації. Київ : ННЦ «ІАЕ», 2019. 312 с. URL: http://iae.org.ua/images/documents/monografii/2019_innov_agrar.pdf
13. Lagnelöv J. Electric autonomous tractors in Swedish agriculture: a systems analysis of economic, environmental and performance effects [дисертація]. Swedish University of Agricultural Sciences. 2023. DOI: 10.54612/a.38bsj5ulc1
14. Lantmännen. Unique robot project for the Farming of the Future [Електронний ресурс]. 2021. URL: <https://www.lantmannen.com>.
15. Lundström C., Larsson R., Nylund M. Autonomous agricultural robotics in Sweden: Status and research agenda. *Journal of Agricultural Engineering*. 2022. Vol. 53, № 3. P. 187–200. DOI: 10.4081/jae.2022.11027.
16. Milioto A., Lottes P., Stachniss C. Real-time semantic segmentation of crop and weed for precision agriculture robots. arXiv preprint. 2017. arXiv:1709.06764.
17. NIBIO. Senter for Presisjonsjordbruk. 2022. URL: <https://nordictestbednetwork.se>
18. Pedersen S. M., Fountas S., Have H., Blackmore B.S. Agricultural robots – System analysis and economic feasibility. *Precision Agriculture*. 2017. Vol. 18. P. 295–308. DOI: 10.1007/s11119-017-9508-z
19. Pedersen S. M., et al. Economics of robots and automation in field crop production. *Precision Agriculture*. 2019. Vol. 21. P. 278–299. DOI: 10.1007/s11119-019-09667-5.
20. Петренко В. І. Перспективи розвитку точного землеробства в Україні. *Техніка АПК*. 2020. № 3. С. 18–24. URL: <http://irbis-nbuv.gov.ua>.
21. Петренко В. І. Розвиток точного землеробства в Україні: перспективи і виклики. *Техніка АПК*. 2020. № 2. С. 20–26. URL: <http://irbis-nbuv.gov.ua>
22. Пугачова Т. О. Цифрові технології в агропромисловому виробництві України. *Економіка АПК*. 2022. № 9. С. 88–95. URL: http://eaprk.org.ua/sites/default/files/eaprk/2022/2022_09/14.pdf
23. Pretto A. et al. Building an aerial-ground robotics system for precision farming: an adaptable solution. arXiv preprint. 2019. arXiv:1911.03098



24. Sørensen C. G., Pesonen L., Fountas S. et al. Functional requirements for a future farm management information system. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2010. Vol. 76, № 2. P. 266–276. DOI: 10.1016/j.compag.2011.02.005
25. Sørensen C. G., Fountas S., Pedersen S. M., Blackmore B. S. *Robotic Seeding: Economic Perspectives*. In: *Precision Agriculture: Technology and Economic Perspectives*. Cham: Springer, 2017. P. 167–179. <https://doi.org/10.3390/plants13233372>
26. Єрмаков О. Ю., Клименко В. В. Сучасні технології точного землеробства: агронавігація та автоматизація. *Вісник аграрної науки*. 2021. № 9. С. 75–83.
27. Шеремет А. М., Шеремет О. І., Литвин О. М. Цифровізація аграрного виробництва в умовах сталого розвитку сільських територій. *Економіка та прогнозування*. 2021. № 4. С. 84–93. URL: <https://doi.org/10.15407/eip2021.04.084>

Стаття надійшла до редакції 02.10.2025

Стаття прийнята 01.11.2025

Статтю опубліковано 22.12.2025



V. Mitkov

Dmytro Motornyi TAVRIA State Agrotechnological University

USE OF ROBOTIC SYSTEMS IN AGRICULTURE: ANALYSIS OF PRECISION FARMING PRACTICES IN SCANDINAVIAN COUNTRIES

Summary

The article examines the use of robotic systems in crop production using the example of precision farming practices in Scandinavian countries—Sweden, Denmark, and Norway. The relevance of the topic is due to the growing challenges facing the agricultural sector in the context of climate change, labor shortages, the need to improve resource efficiency, and ensuring the environmental sustainability of production. An analysis of the implemented technological solutions was carried out, in particular autonomous ground robots, systems for accurate monitoring of soil and plant condition, as well as integrated management of crop nutrition and irrigation. The methodological basis of the study is a comparative and analytical approach using statistical data, case studies, and expert assessment of the economic efficiency of robotic technologies.

The results of the study showed that the introduction of smart robotic systems in Scandinavian countries has led to a 15–25 % increase in productivity, a reduction in fuel and agrochemical costs of up to 30 %, and a decrease in negative environmental impact. The prospects for adapting similar solutions for the Ukrainian agricultural sector, especially in the context of integration into the European Union, are justified. The main barriers and risks associated with insufficient digital infrastructure, limited access to investment, and low technological readiness of small agricultural enterprises have been identified. The practical significance of the study lies in the development of strategic recommendations for adapting the Scandinavian experience to Ukrainian realities with the aim of sustainable development of the agricultural sector.

Keywords: precision farming, agricultural robots, Scandinavia, digitalization of agriculture, smart technologies, sustainable development, innovations in the agricultural sector.